

ניסוי – חומרי ננו בטבע

מדריך למורה

בניסוי זה התלמידים ילמדו על הזיקה בין ננו מבנים המצויים בחומרים טבעיים ובין תכונותיהם. במדריך זה, אנחנו מציגים לפניך חומר רקע כמו גם הנחיות לעריכת הניסוי.

מטרות

- מודעות לקיומם של חומרי ננו בטבע (חלב וג'לטין למשל)
 - להוכיח בעקיפין את קיומם של ננו חלקיקים בחומרים טבעיים על סמך תגובת האור בקולואידים
 - הבנת הקשר בין מבנים בסקאלת ננו ובין תפקוד החומר בסקאלה המאקרוסקופית
 - הבנת האופן שבו שינוי הקשרים בין מולקולות החומר, כמו בחלב לדוגמה, מאפשר תוצרים שונים (גבינה, יוגורט וכולי) בעלי תכונות מקרוסקופיות שונות (טעם ריח וכולי)
- לניסוי שני חלקים:

חלק א': בדיקת חומרי ננו טבעיים ומציאת ראיות עקיפות לננו מבנים שהם מכילים

חלק ב': בדיקת חומרי ננו טבעיים והבנת הקשר בין הננו מבנים שהם מכילים ובין תכונותיהם

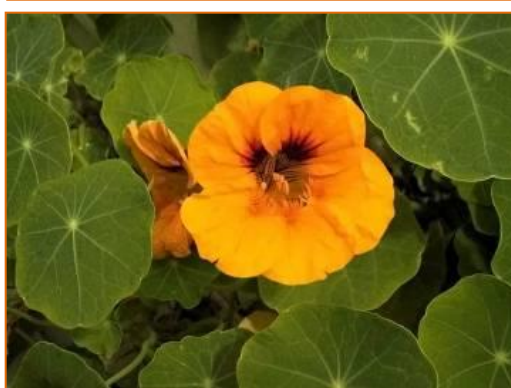
מיאון תביעה: יצוין שהניסויים המתוארים בערכת הכשרה זו כוללים שימוש בכימיקלים שיש לנהוג בהם על פי גיליון בטיחות מתאים ולפי כללי הבטיחות של בית הספר. יש להשתמש בצידוד מגן אישי כמפורט. כנהוג עם כימיקלים בכלל, יש לנקוט אמצעי זהירות. אין לשאוף מוצקים ויש להימנע ממגע שלהם עם העור, העיניים והבגדים. יש לרחוץ ידיים היטב לאחר העבודה עם החומרים. יש לסלק את החומרים העודפים כמפורט בזאת. את כל הניסויים יש לבצע בנוכחותו של מחנך שהוכשר להוראת מדעים. האחריות לכל הניסויים מוטלת על המנסיים. אוניברסיטת ארה"ס (iNANO) וקונסורטיום NANOYOU בכללותו אינם אחראים לכל נזק או הפסד שייגרם כתוצאה מביצוע הניסויים המתוארים להלן.

חומרי ננו טבעיים

כל חומר המצוי בטבע (אם בעולם החי או הדומם) בלי עיבוד או שינוי בידי אדם, ושהוא בעל תכונות מיוחדות בשל **ננו מבנים המוכלים בו מעצם טבעו** נקרא אצלנו "חומר ננו טבעי".

הסיווג והתכונות הכימיות של חומרים תלויים במבנה המולקולרי שלהם. הננו מבנים שבחומרים ביולוגיים נובעים מסידור על-מולקולרי, כלומר קיבוץ של עשרות עד מאות מולקולות לצורות ומבנים מרחביים בסדר הגודל ננו. תגובתם של אור, מים וחומרים אחרים לאותם מבנים מעניקה לחומרים אלה תכונות יוצאות דופן שבאות לידי ביטוי גם בסדר הגודל הנראה לעין.

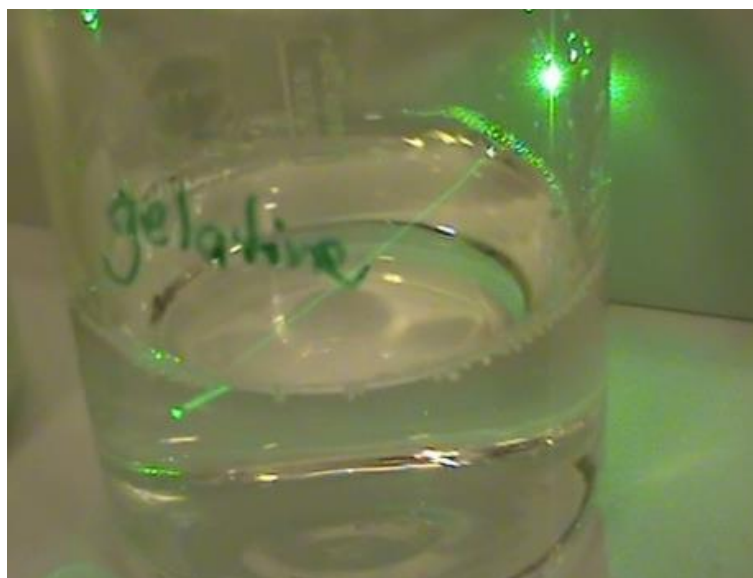
יש מאות דוגמאות לחומרי ננו ותוצאים של מדעי ננו שאנו נתקלים בהם תדיר ביומיום. הליכת השממית על התקרה כאילו כוח הכבידה אינו משפיע עליה, למשל, או הצבעים הזורחים של כנפי הפרפר ומאור הגחליליות בלילה. בעולם הטבע אנחנו מוצאים פתרונות מרשימים



איור מס' 1 – דוגמאות לחומרי ננו טבעיים¹

משמאל למעלה עם כיוון השעון: פרפר, כף רגל של שממית, עלה של צמח כובע הנזיר (Nasturtium), חלב.

לבעיות סבוכות, פתרונות שמספקים ננו מבנים מורכבים בעלי ייעוד מסוים ומוגדר.



איור מס' 2 – בדיקה של דגימת הג'לטין בעזרת מצביע לייזר.

¹הצגת חומרי ננו טבעיים לכיתה היא דרך מעוררת השראה להדגים את מדעי הננו. רבים מהחומרים הטבעיים שהתלמידים מכירים היטב מתאפיינים בתכונות שנובעות מהננו מבנים שלהם. בניסוי זה ינתחו חומרי הננו הטבעיים חלב וג'לטין. שניהם קולואידים. קולואיד (מקפה בעברית) היא תערובת שבה חומר אחד מפוזר באופן אחיד בכל נפחו של חומר אחר, אבל חלקיקי החומר המפוזר רק מרחפים בתערובת ואינם מומסים בה כליל (כמו תרחיף, להבדיל מתמיסה). חלקיקי החומר יכולים להיות בפאזה גזית, נוזלית או מוצקה, וכך החומר המקיף יכול להיות גזי, נוזלי או מוצק. כלומר עשן, וערפל גם הם יכולים להיות קולואידים אם החלקיקים קטנים מספיק. ככלל, גודל החלקיקים המרחפים בקולואיד הוא בין 10 ל-300 ננומטרים, אך מכיוון שישנם ויכוחים רבים על התחום המדויק המוגדר כננו, ובסופו של דבר יש כאלה המתייחסים לתרחיף כאל קולואיד אפילו בתחומים של 5-1000 ננומטר (וזהו התחום שמוצג בדפים לתלמיד). החלקיקים המרחפים בקולואיד קטנים דים להתפזר באופן אחיד ולהפיק תערובת הומוגנית למראה, אבל גדולים דיים לפזר אור. לרוב החלקיקים מפוזרים באופן אחיד כל כך, שהקולואיד נראה כמו תמיסה, (למשל שקוף). לכן מבחן הלייזר המתואר להלן עוזר מאד כדי להבחין בין תמיסה לקולואיד, ומספק ראיה עקיפה לנוכחותם של ננו חלקיקים בקולואיד.

הדרך הפשוטה לבדיקה אם תערובת שקופה היא תמיסה או קולואיד היא להקרין דרכה קרן לייזר. רק קולואיד יפזר את הקרן. אזכרה: לעולם אין להקרין אלומת לייזר לכיוון עיניי אנשים ואין להביט בה ישירות! תלמידים ישתמשו בלייזר רק לצורך הניסוי, ורק בהשגחה ישירה של המורה.

¹ תמונה: ל' פיליפוני, iNANO, אוניברסיטת ארה"ס, Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0

בניסוי זה התלמידים ייווכחו שבלי ננו מבנים, חומרים נפוצים ביומיום, כמו חלב, היו מתנהגים ונראים אחרת.

בניסוי זה התלמידים:

1. יכינו ג'לטין ויודאו בעזרת מצביע לייזר שהוא קולואיד.
2. יודאו שחלב הוא קולואיד ויגרמו להתלכדות החלקיקים שבו בעזרת חומצה. בניסוי זה יגלו התלמידים ראייה מעשית לקשר שבין מבנה ותכונות, ולכך ששינוי הארגון המרחבי של המולקולות, בחלב במקרה זה, משנה את צבעו, ריחו וטעמו.

ג'לטין

ג'לטין הוא מוצק חסר טעם המופק מהקולגן שבעורם ועצמותיהם של בעלי חיים. הוא משמש להקרשה של מוצרי מזון (עוגות וכיוצא בהן), לייצור תרופות (לדוגמה, כמוסות ג'לטין), למוצרי קוסמטיקה ולצילום.

הג'לטין הוא **חלבון** המופק על ידי **הידרוליזציה חלקית של הקולגן** המצוי בעצמות, ברקמות חיבור, באיברים אחדים, ולפעמים במעיהם של **יונקים** כדוגמת חזירים. אבל היום הולך ונפוץ השימוש ב**דגים** כמקור לג'לטין.

בהידרוליזציה (הִדְרוֹל בעברית) החלקית של הקולגן ניתקים מקצת הקשרים המולקולריים שבין גדילי הקולגן, והגדילים מסתדרים למבנה גמיש יותר (ג'לטין). לכן ההרכב הכימי של הג'לטין דומה מבחינות רבות לזה של הקולגן, שממנו הוא מופק.

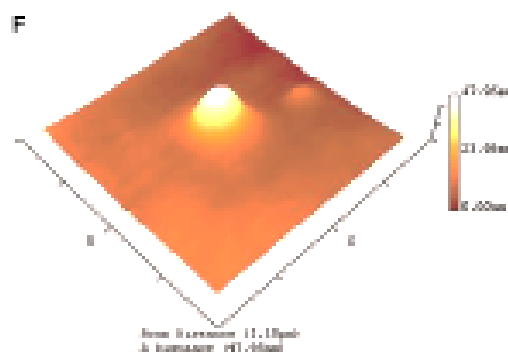
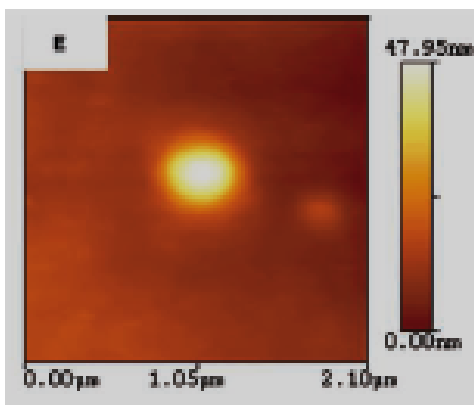
הג'לטין נשמר לרוב באבקה. כשמערבבים אותו עם מים מתקבלת תמיסה צמיגית, וזו נקרשת לג'ל כשהיא מתקררת – **ג'ל (תְּקִיש) קולואידי**. תקריש הג'לטין מתמוסס לנוזל בחימום, ושב ומתמצק בקירור. כלומר, קיומו בצורת ג'ל מוגבל ל**תחום טמפרטורות מסוים**.

בעובדה שהג'לטין הוא קולואיד ולא תמיסה אפשר להיווכח בקלות על ידי העברת קרן של מצביע לייזר דרכו כשהוא במצב ג'ל. נתיב האור המפוזר נראה ברור (אפקט טינדל). התוצאה הזו מתקבל משום שהננו חלקיקים שבקולואיד מפזרים את האור. התלמידים יבדקו ויכירו את האפקט. **אזהרה:** לעולם אין להאיר אלומת לייזר בקרבת עיני אנשים ולא להסתכל בה ישירות!



מה ננו בזה

במחקרים עדכניים שנעשו בעזרת **מיקרוסקופים מסוג מיקרוסקופ כח אטומי (AFM)**, נמצא שהג'לטין אכן מורכב מאינספור **ננו מבנים**. כל סוג של ג'לטין מתאפיין בצורה שונה של ננו מבנים אלו. מחקר בעזרת AFM של ג'לטין מעור של דגי שפמנון (*Ictalurus punctatus*), גילה **נקבוביות טבעיות** בקוטר 118 ננומטר במוצע, ו**ננו-תלכידים כדוריים** בקוטר ממוצע של 260 ננומטר. ההשערה היא שהמבנים האלה נוצרים כאשר המים חודרים אל תוך מולקולות הקולגן בהידרוליזציה. **הימצאותם של ננו מבנים אלה מוכיחה שהג'לטין הוא קולואיד ומסבירה את העובדה שהוא מפזר אור (שימו לב שישנם שתי תרומות להיות ²החומר קולואיד: הנקבוביות והכדוריות).**



איור מס' 3 – דימות AFM של ג'לטין מדגי שפמנון מראה ננו מבנים כדוריים.

חלב

חלב הפרה מכיל מולקולות של מיני חומרים ביולוגיים, שומנים וחלבונים למשל, המפוזרות בתוך מים. כמות החלבונים היא 2.5 עד 3.5 אחוזים, תלוי בזן הפרה. כ-80% ממולקולות החלבון הן **קזאיניות** והשאר מסוג וואי (whey) או סרום (serum). החלבונים הקזאניים בחלב מונים ארבעה סוגים: קזאין- α_{s1} , קזאין- α_{s2} , קזאין- β וקזאין-k. הקזאניים הם **פוסופורטאינים** השוקעים ב-pH 4.6 (זאת הנקודה האיזואלקטרית שלהם), בעוד החלבונים מסוג וואי נשארים מסיסים. תכונה אחרת של הקזאניים היא שהם מתקבצים במיצלות (micelles) שגודלן בין **50 ל-300 ננומטרים**. המיצלות מורכבות מהקזאניים ומסידן זרחתי ומעט ציטראט. ולפיכך, החלב הוא קולואיד (תערובת ובה ננו חלקיקים המפוזרים באופן אחיד בנוזל התווך, אבל מרחפים בו כך בלי להתפרד למולקולות יחידות). המיצלות

² תמונה: תדפיס בהרשאת Eiley-Blackwell publishing ltd מתוך המאמר של Yang et al ב-Journal of Food Science, (2006), (8)72, עמ' c430 – c440, זכויות יוצרים Wiley-Blackwell Publishing Ltd. (2006)

שבחלב (וכן מולקולות ביולוגיות אחרות, כגון שומנים שונים) הן שונות לו את צבעו הלבן, משום שהן מפזרות אור.

אף על פי שחלב הוא קולואיד, הוא אינו שקוף, לכן אם מאירים על כוס חלב, קשה להעזר באפקט טינדל. אבל בחלב מדולל (במים, בשיעור 1% חלב) אפשר להבחין באפקט. התלמידים יראו את האפקט הזה. **אזהרה:** לעולם אין להאיר בלייזר בקרבת עיני אנשים ואין להסתכל באלומה ישירות!

ממבנה לייעוד

הסידור העצמי המדויק של מולקולות החלבון והמינרלים השונים בחלב הוא אחד היסודות שעליהם נבנית יכולתו למלא את ייעודו – להעביר סידן מהאם לצאצא היונק. מחקרים רבים הראו שמסידור עצמי זה מתקבלים ננו מבנים בעלי תפקיד מוגדר (**מיצלות קזאינים**). בחלק הבא נתאר איך שילוב של אינטראקציות אלקטרוסטטיות ותכונות הידרופוביות של חלבוני החלב ואחדים מהמינרלים הנספחים אליהם מנמיכים את המבנה הננומטרי הסופי של המיצלות. מבנה זה חשוב, שכן אילולי הסידור המורכב הזה, הסידן לא היה נכלא בתוך מיצלות החלבון, והחלב לא היה ממלא את תפקידו הביולוגי.

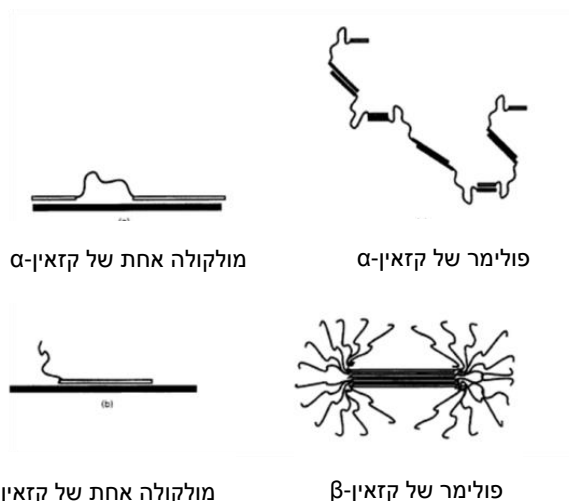
עיבוד חלב

בתעשיית מוצרי החלב מרבית **לעבד את החלב** בשיטות שונות. יוגורט למשל הוא מוצר של חלב מותסס המתקבל באמצעות גידול מבוקר של מיקרואורגניזמים מסוימים, בעיקר חיידקים. אלה הופכים את הלקטוז (סוכר החלב) לחומצה לקטית, חומצת חלב. הורדת ה-pH של החלב משנה את מרקמו ואת טעמו. להכנת גבינה משתמשים באנזימים הגורמים להתלכדות ולשקיעה של הקזאינים. כפי שיוסבר בחלק הבא, כל השיטות לעיבוד חלב כוללות **שינוי של סידור מולקולות הקזאינים**. שינויים אלה גורמים להסמכה, שקיעה ותוצאים אחרים. מראה החלב, טעמו ותכונות "מקרו" אחרות שלו, קשורות בקשר הדוק להננו מבנים העל-מולקולריים שבו. **בניסוי זה התלמידים ישתמשו בחומץ (כחומר חומצי) ובחום לשינוי תכונות החלב.**

קזאינים

בין סוגי החלבון שבחלב ישנם חלבונים ממשפחת הקזאינים. למולקולות הקזאין בחלב (שה-pH שלו הוא כ-6.7 – קרוב לערך הנייטרלי) יש מטען חשמלי שלילי (נקודה איזואלקטרית: 4.6). כל הקזאינים למעט קזאין-k, יכולים להיקשר ליוני סידן, Ca^{2+} . ההתקשרות נעשית בעיקר באמצעות השארית הפוספטית של הקזאין. הקשר עם יוני הסידן הכרחי למילוי

ייעודו של החלב – להוביל סידן (ומזינים אחרים) מהאם לרך הילד. כל קזאין מורכב מרצף פפטידים שונה, לפיכך הם שונים זה מזה במבנה השניוני והשלישוני שלהם. **המבנה המדויק של הקזאינים עדיין נחקר ונידון במדע.** אי הוודאות נובעת מכך שלא ניתן **לגבש קזאינים** (שלא כמו סוגי חלבון אחרים). מחקרי NMR (תהודה מגנטית גרעינית)

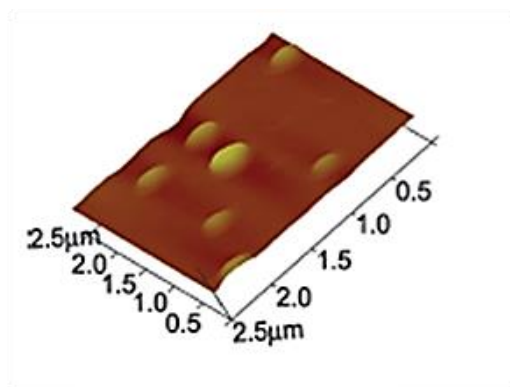


לבירור מבנה הקזאינים התמקדו עד כה בניתוח הפפטידים בלבד. המודל המעודכן ביותר של מבנה השלישוני של הקזאין מבוסס על מחקרים רבים שהתבססו על דיכרואיזם מעגלי, ספקטרוסקופיית ראמאן, וספקטרוסקופיית אינפרא-אדום (FTIR analysis). המודל המעודכן ביותר המבנה השלישוני של הקזאין מבוסס על **ראיית הקזאין כקופולימר גושי**. בקזאין ה- α , לחלבון יש **שני אזורים הידרופוביים וביניהם ליבה הידרופילית**. לפי התאוריה, פרוטאין זה אמור להסתדר מאליו במבנה train-loop-train, כמוצג ב**איור מס' 4**. הסברה היא שהקשרים הבין-מולקולרים בחלבון זה יוצרים שרשרת פולימרית דמוית תולעת. **לקזאין ה- β** לעומת זה, יש **קצה אמיני (N-terminal) בעל מטען גבוהה וקצה קרבוקסילי (C-terminal) הידרופובי**, וחושבים שחלקיו מסתדרים במבנה tail-train. ההשערה היא שההתחברות העצמית של מולקולות אלה יוצרת "פולימר מיצלי" בעל ליבה הידרופובית וחץ "שעיר" והידרופילי. מבנה ה-**k-קזאין** הוא תמונת מראה של קזאין ה- β , ולפיכך הוא מורכב מפפטיד בעל **קצה אמיני נייטרלי והידרופובי וקצה קרבוקסילי טעון**. קזאין ה-k אינו יכול לקשור יוני סידן, וחשיבותו בכך שהוא ממלא תפקיד של מייצב במיצלה.

איור מס' 4. תיאור סכמטי של מבני קזאינים ופולימרים קזאיניים. המלבנים שבאיור מייצגים אזורים הידרופוביים. תדפיס מתוך Elsevier, Horne D.S., Inter. Dairy Journal (1998) 8, (3), 171-177.

מיצלות קזאינים: מבנה ותכלית

הסברה היא שהקזאינים מתקבצים בחלב ל**מיצלות** (micelles, ביחיד: מיצלה) שקוטרן **50 עד 300 ננומטרים**. המיצלות מכילות את **הקזאינים יחד עם סידן, פוספט ומעט ציטראט**. מבנה המיצלות הקזאיניות (בדומה למבנה הקזאינים עצמם) עדיין פתוח לדיון מדעי והוא נחקר באופן נרחב.



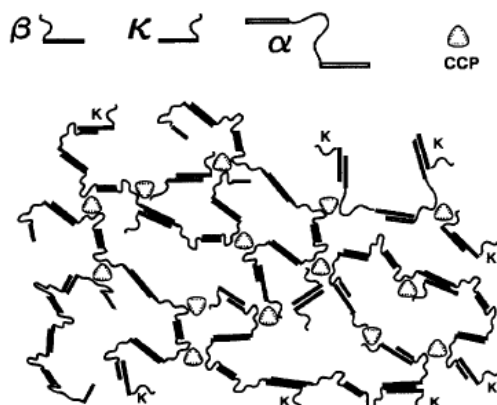
מיצלות קזאינים

איור מס' 5 – דימות AFM של מיצלת קזאינים בחלב. (תדפיס בהרשאה מתוך, Shekar et al., PANAS (May 23' 2006), vol.103, no.21, pp 8000-8005 זכויות יוצרים © 2006 National Academy of Sciences, USA).

מאחר שלכל הקזאינים יש אזור הידרופובי ואזור קוטבי, סבורים המדענים שאינטראקציות הידרופוביות, ולא רק אלקטרוסטטיות, משפיעים על ההתחברות העצמית של הקזאינים למיצלות. מיצלות הקזאינים שונות מהפולימרים הקזאיניים הנפרדים בהיבט מכריע אחד: הן מכילות סידן זרחתי, חומר לא אורגני, המקובץ בהן בתצמידים ננו-גבישיים שמכונים **ננו-צברי סידן (calcium nanoclusters)**. הראיה לכך שהיציבות של מיצלות הקזאינים אינה נובעת מאינטראקציות אלקטרוסטטיות בלבד היא שאפשר **להפריד אותן בעזרת שינון (urea)**, בלי לנתק את הקשרים עם הסידן הפוספטי.

מניחים שבמיצלות הקזאינים יש **שני סוגים של קשרים בין קזאינים**:
- האחד הוא קשר **הידרופובי**, באשר שני אזורים הידרופוביים של מולקולות שונות (קזאין- α וקזאין- β) מתקבצים לצביר קשור. את הקשרים האלה מייצגים **הפסים המלבניים באיור מס' 6**.

- השני הוא קשר בין **אזורים הידרופיליים טעונים** המכילים צברי פוספוסרין שנקשרים לננוצבירים של סידן זרחתי המרחפים בקולואיד החלב (ראשי התיבות CCP במקרא של **איור מס' 6**).



איור מס' 6 – מודל הקשרים הדואליים במיצלת קזאינים. הצגת הקזאינים השונים (α , β , κ) מוסברת במקרא האיור. תדפיס מתוך Horne D.S., inter. Dairy Journal (1998), 8 (3), 171-177, בהרשאת Elsevier.

ה-k-קזאינים חסרים את הקבוצה הפוספוסורינית המתקשרת לצבירי הננו הסידיניים, לכן חיבורם מתאפשר רק מכוח אינטראקציות הידרופוביות. כמו כן, המיצלה אינה יכולה לגדול עוד, מעבר ל-k-קזאינים, לכן הם משמשים כשכבה החיצונית שלה. **תפקידם של ה-k-קזאינים הוא לייצב את מיצלת הקזאינים,** הן למנוע גידול-יתר של המיצלות והן למנוע התלכדות שלהן אלה לאלה, שיכולים להביא לשקיעה (פרסיפיטציה).

התפרדות והתלכדות של מיצלות קזאינים

כמוסבר בקווים כלליים לעיל, משערים שלמיצלות הקזאינים יש מבנה מורכב שנובע משילוב ואיזון של תוצאים הידרופוביים ואלקטרוסטטיים. שמירה על שלמות המיצלה משולה להליכה על חבל דק, ויש שיטות רבות להפר את שיווי המשקל. שיטות אלה מנוצלות למכביר בתעשיית מוצרי החלב. בעזרתן מכינים גבינה ומוצרי חלב מותסס כדוגמת יוגורט. אנחנו נציג כאן סקירה קצרה של השיטות הללו. לא ניכנס לעומקם של תהליכי ייצור, אבל המורה המתעניין יוכל למצוא מידע נוסף בפרק "קריאה נוספת" שבמסמך זה.

- העלאת ה-pH (בערך ל-8) גורמת להתפרדות (dissociation) של מיצלת הקזאינים.

התוצא הנראה לעין של עובדה זו הוא שחלב מחומם נעשה שקוף יותר. הסיבה לכך היא שעליית ה-pH מעל ערכו הרגיל, הנייטרלי, משנה את הרכבן של קבוצות הפוספוסריל מיחידות בעלות מטען יחיד ליחידות עם מטען כפול, שאינן יכולות עוד להתקשר עם הננוצבירים הסידיניים. התחזקות המטען השלילי של המיצלה גורם לדחייה אלקטרוסטטית, והמיצלה מתפרדת.

- **הורדת ה-pH לנקודה האיזואלקטרית (4.6)** גם היא מפרידה את מיצלת הקזאינים. זה משום שמיצלות הקזאינים קיימות רק בזכות נוכחותו של הסיידן הזרחתי. לכן התמוססותו של הסיידן הזרחתי בהכרח משפיעה על יציבות המיצלה. הורדת ה-pH גורמת לטיטור (titration)

של קבוצות הפוספוסריל והקרבווקסיל שבמולקולות החלבון. בלי המטענים השליליים, אין הקבוצות הללו יכולות להתקשר לננוצבירי הסידן-זרחתיים הקולואידיים, ואלו נפלטים מהמיצלה. יש לציין ששינוי זה אינו בהכרח מביא להתפרדות הקזאינים מהמיצלה ולשקיעה. בטמפרטורה נמוכה מ-25 מעלות צלזיוס, מתגברת ההתפרדות, אבל מלבד זאת, הקזאינים נשארים מאוגדים במיצלות. תוצא זה ייבדק בניסוי שלפנינו על ידי הוספת חומץ (חומצה) לחלב קר. הסיבה לדבר נעוצה בכך שיציבות מיצלת הקזאינים אינה תלויה אך ורק בקשרים האלקטרוסטטיים, אלא גם באינטראקציות הידרופוביות. אינטראקציות אלה מושפעות מאוד מהטמפרטורה: ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, כך הן חזקות יותר. לפיכך, יחסי הגומלין ההידרופוביים חזקים מספיק כדי לשמור על יציבות המיצלה בחלב קר אפילו כשמורידים את ה-pH לנקודה האיזואלקטרית, אך לא חזקים מדי - כך שהם לא גורמים להפרדות הפאזות ולשקיעה. ומצד שני, אם הגברת החומציות מתרחשת לאחר שהחלב חומם (ל-60 מעלות בערך), המיצלות מתפרדות (הסידן הזרחתי משתחרר), ובשל התגברות הכוחות האלקטרוסטטיים והתגברות התגובות ההידרופוביות המולקולות מתלכדות לגושים גדולים השוקעים לתחתית הכלי. תופעה זו תיבחן בתרגיל זה על ידי הוספת חומץ לחלב חם ולחלב קר.

- התקפה של כימוסין מביאה להתפרדות המיצלות ולהתהוות גבן. תהליך זה משמש לייצור גבינה. הכימוסין הוא אנזים פרוטאוליטי. הוא המרכיב הפעיל העיקרי בתערובת ההגבנה (rennet). תערובת זו (בעברית רנין או מו) מופקת מקיבות של עגלים. הכימוסין תוקף קשר יחיד ומסוים בקזאין ה-k, ומחלק את המולקולה לשני פפטידים: האחד נשאר מחובר למיצלה, והשני מתמוסס בסביבה הנוזלית. כנזכר לעיל, קזאין ה-k חיוני ליציבותן של מיצלות הקזאינים ולהפרדה ביניהן, ולכן התפרקותו מפירה יציבות זו. המיצלות מתלכדות ובסופו של דבר מצטרפות לגבן.

- הוספה מבוקרת של חיידקי חומצה לקטית (חיידקים שמפרישים חומצה לקטית, כדוגמת לקטובצילוס, לקטוקוקוס ולאוקונוסטוק) בתנאי עיבוד מסוימים מתסיסה את החלב ומניבה מוצרי חלב מותסס כגון יוגורט. תהליך זה שונה מהחמצה פשוטה משום שהחלב גם מחומם וחלבוני ואיי (whey) משתתפים בתהליך גם כן. הקרישה (קואגולציה) היא תוצאה של עליית החומציות, אבל היא לא מביאה להיווצרות גבן, אלא לתוצר סמיך יותר מחלב רגיל.

קל לראות את תופעת ההתלכדות בחלב מקולקל שתאריך תפוגתו חל מזמן. במקרה זה, חיידקי החומצה הלקטית הם שאחראים להעלאת החומציות של חלב ולהתלכדות הגושים חמוצי הריח שנובעת ממנה.

בניסוי זה התלמידים ישתמשו בחומץ (כמקור לחומצה) ובחום לשינוי תכונות החלב.

מה אפשר ללמוד מהניסוי הזה על ננוטכנולוגיה?

כללית, התלמידים ילמדו שני רעיונות בסיסיים בתרגיל הזה:

- **מבנה משפיע על מראה:** חומרים בעולם הטבע "האמיתי", חומרים כמו חלב למשל, נראים כפי שהם נראים בגלל ננו מבנים מורכבים שהם מכילים. החלב לבן משום שהוא קולואיד שמרחפים בו חלקיקי-ננו (מיצלות הקזאינים) וכדוריות שומן. כאשר משנים את מבנה המיצלות, משתנות כמה מתכונות ה"מקרו" של החלב, כמו **הצבע והריח שלו**.
- **מבנה קשור לתפקוד:** כל חומר אורגני מתנהג בצורה מאוד מסוימת שמוכתבת מסידור העל של המולקולות שלו. קבוצות של מולקולות מסתדרות בנו מבנים. כאשר משנים את המבנים האלה, יכול להתקבל חומר שמתנהג בצורה שונה וממלא תפקיד חדש. בייצור מוצרי חלב, שינוי מיצלות הקזאינים בתהליכים שונים (לדוגמה, הוספת כימוזין או התססה על ידי חיידקי חומצה לקטית) מניב מוצרים שונים (גבינה, יגורוט וכולי). **זאת היא בדיוק התפיסה שמנחה את הננוטכנולוגיה:** להנדס חומרים כדי להעניק להם תכונות חדשות על ידי התערבות בסידור המולקולות שלהם.

קריאה נוספת למורה: פרק 2 "חומרי ננו טבעיים" ופרק 4 "תוצאי ננו בסיסיים" ביחידה 1 של ערכת NANOYOU להכשרת מורים בננוטכנולוגיה.

דרכי הוראה אפשריות

1. התחילו בדיון על חומרי ננו טבעיים. איך הם מוגדרים? תנו לתלמידים להציע חומרים שהם מכירים ולא שוחח איתם על דוגמאות כמו רגלי השממית, כנפי הפרפר, עצמות או ננו מבנים ביולוגיים כמו DNA, פריטין (ferritin), כלורופיל וכדומה.
2. קיימו דיון בדבר הזיקה שבין מבנה ותפקוד. אפשר להתחיל ברמת המקרו (למשל, איך משרת מבנה של בניין את התפקוד של עמידה ברעידות אדמה) ומשם עבור לסדר הגודל ננו.
3. דברו עם התלמידים על ידיעותיהם בנושא ג'לטין וחלב. מה קורה כשמחממים אותם? כשמקררים אותם? מה קורה אם החלב נשאר במקרר זמן רב לאחר התאריך האחרון לשיווק?

4. המשיכו לניסוי המתואר בחלק הבא.

5. סיימו בדיון על קולואידים מוכרים אחרים כגון דם, מיונז, עשן. עולם הננו מקיף אותנו תמיד!

חומרים

חומרי הניסוי מפורטים להלן בהנחה שהתלמידים יעבדו בזוגות.

חומרים לכיתה כולה (לחלוקה)

- 100 גרם ג'לטין מעור חזיר (G1890 בקטלוג Sigma-Aldrich. מחיר לכמות זו: כ-34 אירו)

- 1 ליטר חומץ בן יין לבן

- 1 מצביע לייזר בדרגה IIIA 3A (מכשיר אחד יכול לשמש את הכיתה כולה, אבל עדיף שיהיו כמה, שימו לב: השימוש של התלמידים במצביע הלייזר צריך להיות בהשגחה ישירה של המורה)

- קומקום, אם אין אפשרות לספק לתלמידים פלטות חשמליות.

חומרי ניסוי לזוג:

- פלטה חשמלית לחימום

- 2 כוסות מעבדה בנפח 50 מיליליטר

- 1 כוס מעבדה אחת בנפח 200 מ"ל

- 2 כוסות מעבדה בנפח 500 מ"ל

- 4 רצועות של נייר לקמוס

- 1 כף

- 800 מ"ל חלב רזה

- 4 כפות חומץ לבן

- מדחום

- מרית

- כפפות לטקס

- משקפי מגן

דגש בטיחות: ניסוי זה אינו כולל כימיקלים, אלא רק נזלים ומוצקים המצויים בכל בית. אבל הוא יכול לגרום להכתמה של עור וציוד, לכן יש לשטוף היטב את הידיים ואת המשטחים לאחר הניסוי. יש להגן כפי הצורך על הבגדים ולהשתמש בכפפות ובמשקפי מגן. יש לאגור את כל המים והנזלים בכלי זכוכית או פלסטיק ולשפוך אותם לכיור. כל הניסויים הם על אחריות המנסה בלבד. אוניברסיטת ארה"ס (iNANO) וקונסורטיום NANOYOU בכללותו אינם נושאים באחריות לכל נזק או הפסד שייגרם מביצוע הניסויים המתוארים בזאת.

חלק א': בדיקת חומרי ננו טבעיים והוכחה בלתי ישירה להימצאותם של ננו מבנים בחומר

לצורך ניסוי זה כל זוג תלמידים צריך:

דגימה של ג'לטין צונן

כוס מעבדה עם מי ברז

כוס מעבדה עם חלב

כוס מעבדה ובה חלב מדולל: לכוס מעבדה או כוס רגילה ובה 150 מ"ל של מים מזוקקים
הוסף טיפה או שתי טיפות של חלב (בעזרת פיפטה). בחש היטב והנח לתמהיל לעמוד מעט
(כדי שבועות האוויר יצאו). צבע הנוזל צריך להיות אפור בהיר.

הכנת הג'לטין: הכינו לכל זוג 10 מיליגרם\מיליליטר של ג'לטין על ידי ערבוב של 0.5 מ"ג
אבקת ג'לטין ב-50 מ"ל מים קרים. הניחו את התערובת על הפלטה החשמלית וחממו את
המים עם אבקת הג'לטין. בעוד התערובת מתחממת, בחשו במרית בעדינות (כדי שלא ייווצרו
בועות). הביאו אותה קרוב לרתיחה (בדקו את הטמפרטורה עם המדחום), ואז כבו את
הפלטה והניחו לג'לטין להתקרר. אפשר לחלק את הג'ל לכוסות מעבדה קטנות בעודו נוזלי
(יש למזגו אל דופן הכוס, כדי למנוע היווצרות בועות), ואפשר להמתין שהוא יתמצק, ואז
לחתוך ממנו קוביות לתלמידים. לג'לטין יכול לקחת כשעה להתמצק, ולכן כדאי להכין אותו
מספיק זמן מראש.

דגש בטיחות! אין לגעת בכוס המעבדה מיד. היא תהיה חמה מאוד. לאחר שתתקרר הכוס,
יש להסירה מהפלטה החשמלית ולהניח אותה בבטחה על שולחן המעבדה. אם אינך מחכה,
השתמש בכפפות מבודדות.

שאלה 1: האם אתם רואים גופים או חלקיקים קטנים כלשהם בדוגמאות החומר שלפניכם?
האם אתם רואים חלקיקים כלשהם כאשר אתם מסתכלים בדוגמאות בזכוכית מגדלת?

שאלה 2: תארו מה אתם רואים במבט מלמעלה על דוגמאות החומר. תארו בכתב את
התנהגות אלומת הלייזר בעת מעברה בכל אחד מן החומרים.

ג'לטין:

מים:

חלב:

חלב מדולל:

שאלה 3: כל החומרים מתנהגים באותו אופן? נסו לנחש מה מפריע לאלומת הלייזר לעבור בחומר (שימו לב שאם אתם רואים את האלומה בתוך החומר זה סימן שמשהו מפריע לה בדרכה, שאלמלא כן האור לא היה מגיע אל עיניכם).

שאלה 4: אם כך, מה קרה בניסוי? מלאו את החסר:
ננו-חלקיקים מרחפים בדוגמת החומר, וכשאור הלייזר פוגע בהם הוא משנה את כיוונו. שינוי זה נראה כשביל של אור בתוך החומר, כפי שנראה ב _____ וב _____. הלייזר יוצר כתם של אור מפוזר בחומרים שבהם החלקיקים צפופים עד כדי כך שהאור אינו יכול לעבור דרכם, כמו שנראה ב- _____. ב _____, האור עובר בלי הפרעה, לכן אי אפשר לראות את אלומת הלייזר כאשר היא עוברת בחומר זה.

שאלה 5: תכונות החלב נגזרות ממיצלות הקזאינים שבו. המיצלות הן ננו מבנים כדוריים שקוטנם 50 עד 300 ננומטרים. מהתמונות שבסוף דף עבודה זה, בחרו את דימות ה-AFM המציג לדעתכם מיצלת קזאינים. זכרו: $1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$. הדביקו את התמונה כאן.

חלק ב': בדיקה של חומרי ננו טבעיים לשם הבנת הקשר בין מבנה-ננו ובין תכונות החומר

אינדיקטורי pH משמשים להערכת רמת החומציות של חומרים נפוצים כדוגמת חומץ, לימון, מיץ, חומצה של סוללות ואפילו זיהומים פטריתיים.

- אם ערך ה-pH הוא 7, התמיסה נייטרלית.
- אם ערך ה-pH גבוה מ-7, התמיסה בסיסית.
- אם ערך ה-pH נמוך מ-7, התמיסה חומצית.

לעריכת ניסוי זה תצטרך:

1. כוס מעבדה ובה חלב קר

2. כוס מעבדה ובה חלב חם (60°C)

חימום החלב



הניחו את הכוס עם החלב על פלטה חשמלית, הפעילו את הפלטה וחממו את החלב לכ-60 מעלות צלזיוס. אם אין בנמצא פלטה, אפשר לחמם את החלב על ידי טבילת הכוס בכלי עם מים רותחים (כמודגם בתמונה).

עצה למורה

אפשר להשתמש גם במיקרוגל, אבל אסור שהחלב ירתח או יתחמם יותר על המידה, לכן יש לבדוק קודם מה הזמן הדרוש לחימום החלב עד 60 מעלות באותו תנור שבו תשתמשו.

שלב 1

השתמשו בכוס המעבדה ובה החלב הרזה שבדקת בחלק 1 של הניסוי. בדקו את החלב בנייר הלקמוס (המצביע על רמת החומציות) וציינו בכתב את ה-pH שנמצא. מלא את הטבלה שבעמוד הבא.

שלב 2

מזגו לכוס מעבדה נקייה 400 מ"ל חלב קר. הניחו את כוס החלב על הפלטה החשמלית, הפעילו את הפלטה וחממו את החלב ל-60 מעלות צלזיוס. אם אין פלטה חשמלית, אפשר לחמם את החלב בכלי עם מים רותחים. המורה יאמר לכם כיצד לחמם את החלב. לאחר שהתחמם החלב, בדקו את חומציותו בעזרת רצועה חדשה של נייר לקמוס ורשמו את הערך שמצאתם בטבלה שלמטה. התבוננו בחלב ובחשו בו בכף, ואז תארו בטבלה את מראהו, ריחו, ומרקמו.

שלב 3

תוך כדי בחישה, הוסיפו לחלב הקר שתי כפות של חומץ לבן (זו תמיסה חומצית). מה התגובה (מראה, ריח, מרקם)? רשמו את התצפיות בטבלה. ציינו (בטבלה) את ה-pH של הנוזל שהתקבל. **דגש בטיחות:** אין לטעום את החלב החומצי שהתלכדו בו גושים.

שלב 4

באותו אופן, הוסיפו כמות זהה של חומץ (2 כפות) לחלב החם. בחשו והניחו לתערובת לעמוד דקה או שתיים. זכרו שכוס המעבדה חמה! מה התגובה? (זכרו, לא לטעום!) רשמו את התצפיות בטבלה. ציינו את **רמת ה-pH של הנוזל** שהתקבל. מלאו את הטבלה:

שלב	חומר	טמפרטורה	pH	מצב החלב (מראה, צבע, ריח, סמיכות)
בדיקה 1	חלב	קר		
בדיקה 2	חלב	60 ° C		
בדיקה 3	חלב + שתי כפות חומץ	טמפרטורת החדר		
בדיקה 4	חלב + שתי כפות חומץ	60 ° C		

שאלה 6: האם מצאתם הבדל ברור במצבו של החלב וברמת ה-pH שלו לאחר **חימום בלבד, לפני הוספת החומץ** (בדיקה 1 ובדיקה 2)? אם כן, תארו את ההבדל.

שאלה 7: האם מצאתם הבדל מובהק במצבו של החלב הקר והחלב החם וברמת ה-pH שלו **לאחר הוספת החומץ** (בדיקה 3 ובדיקה 4)? אם כן, תארו את ההבדל.

שאלה 8: על פי התוצאות שקיבלתם בהוספת חומץ לחלב החם ולחלב הקר, האם לדעתכם התגובה המתרחשת בו תלויה רק בחומציות (רמת ה-pH)? נמקו.

עצה למורה

השתמשו בטבלה שלהלן כדי להראות לתלמידים שכדי לקבל את התוצאה במלואה (הפרדת המוצקים מהנוזל), יש לשנות את שני הפרמטרים, רמת ה-pH והטמפרטורה גם יחד.

60 °C	טמפרטורת החדר	
פירוט התוצאה	פירוט התוצאה	חלב
פירוט התוצאה	פירוט התוצאה	חלב + 2 כפות חומץ

שאלה מס' 9: איזה תהליך מהתהליכים שתוארו לעיל עבר החלב בניסוי זה?

שאלה 10: על פי מה שקראתם בדפים אלה, הסבירו את ההבדל בין תגובת החלב הקר לתגובת החלב החם לחומץ.

שאלה 11: האם מולקולות החלבון הפכו למולקולות אחרות בניסוי? אם לא, מה כן השתנה?

שאלה 12: על פי המידע שקראתם, תארו במילים שלכם את מה שקורה למיצלות הקזאנים בתהליך שמניב את מוצר החלב החביב עליכם.